

**Licht- und rasterelektronenmikroskopische
Untersuchungen über die funktionelle
Struktur des Endokards beim Hund**

Vorgelegt

von

Rudolf Herwart Schmidt

aus

Glücksburg/Flensburg



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546216_0009

Aus dem Institut für Anatomie der
Universität Erlangen - Nürnberg
Direktor: Prof.Dr.med.Dr.med.h.c.J.W.Rohen

LICHT- UND RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE
UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE FUNKTIONELLE
STRUKTUR DES ENDOKARDS BEIM HUND

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen - Nürnberg

vorgelegt von
Rudolf Herwart Schmidt
aus
Glücksburg/Flensburg

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Prof.Dr.med. Walter Kersten

Referent: Prof.Dr.med. Elke Drecolt-Lütjen

Korreferent: Prof.Dr.med.Dr.med.h.c.J.W.Rohen

Tag der mündlichen Prüfung: 05.05.1980

Gewidmet meinen verehrten Lehrern

Frau Professor Dr. Elke Drecolt-Lütjen und

Herrn Professor Dr.Dr. Johannes W. Rohen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Material und Methoden	7
2.1. Lichtmikroskopische Methoden	8
2.2. Rasterelektronenmikroskopische Methoden	9
3. Ergebnisse	11
3.1. Die Endothelstrukturen des Endokards	12
3.1.1. Rechter Vorhof	12
3.1.2. Rechter Ventrikel und A.V. Klappen- apparat	15
3.1.3. Linker Vorhof	20
3.1.4. Linker Ventrikel und A.V. Klappen- apparat	21
3.2. Die intraendokardialen und subendo- kardialen Gefäße und Nischen	26
3.3. Morphometrische Befunde	28
4. Diskussion	30
5. Zusammenfassung	39
6. Abbildungen	40
7. Literaturverzeichnis	58

1. Einleitung

Die Zahl morphologischer Untersuchungen über die Struktur der inneren Oberflächen des Endokards und der Gefäße hat in den letzten Jahren stark zugenommen, was nicht zuletzt auch darauf zurückzuführen ist, daß durch die Entwicklung neuer Techniken (Elektronenmikroskopie, Auflichtmikroskopie, Phasenmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie u.a.) bessere Einblicke in die Strukturverhältnisse der Herz- und Gefäßwandung möglich geworden sind (vgl. bes. Zimmermann 1923; Benninghoff 1930; Sinapius 1952, 1956, 1958; Linzbach et al. 1957; Candiolo 1963; Shimamoto, T. et al. 1969; Garbarsch et al. 1970; Lütjen-Drecoll et al. 1970; Maguire 1972; Christensen et al. 1972; Buss 1973; Buss et al. 1973; Wheeler et al. 1972; Lunkenheimer et al. 1973; Büsow 1973; Edanaga 1974; Peine et al. 1975).

Da bei der Präparation von Häutchenpräparaten häufig Artefakte auftreten (Sinapius 1952, 1956), existieren nur wenig Untersuchungen über die Gesamtstruktur des Endokardendothels (Sinapius 1954). Meist beschäftigen sich die Arbeiten nur mit Details einzelner Endokardabschnitte.

Erst mit der Rasterelektronenmikroskopie sind umfassendere Untersuchungen über die gesamte Oberfläche des Herzininnenraumes möglich geworden (Reumuth et al 1968; Buss 1973). Erste Befunde in dieser Richtung stammen von Shimamoto et al. 1969; Bjökerud 1972; Maguire 1972; Wheeler et al. 1972; Buss et al. 1973; Noack et al. 1973; Lunkenheimer et al. 1973; Peine 1975). In diesen Arbeiten steht jedoch meist nur der Vergleich zwischen den licht- und elektronenmikroskopischen Beobachtungen im Vordergrund, ohne daß die funktionelle Struktur des Endokards als Ganzes untersucht worden wäre.

Die funktionelle Struktur des Endothels als innerste Schicht des Strombahnufers, die den Kräften des strömenden Blutes direkt ausgesetzt ist, zu untersuchen, ist mit Schwierigkeiten verbunden. Das liegt vor allem daran, daß sich mit der Licht- und Elektronenmikroskopie (Lm+EM) immer nur kleine Flächen untersuchen lassen. Demgegenüber bietet die Rasterelektronenmikroskopie (REM) die Möglichkeit, größere Flächen, auch solche mit unregelmäßigen Oberflächen, zu überschauen (Reumuth u. Becker 1968; Buss 1973). Häutchenpräparate von der Intima größerer Gefäße oder der Serosa, die mit Silbernitrat vor (Vorversilberung) oder nach der Fixation (Nachversilberung)

imprägniert worden sind, zeigen im durchfallenden Licht meist ein feingezogenes Linienmuster, in dessen Maschen die Zellkerne liegen (Abb. 5, 8, 10). Bei der Analyse derartiger Häutchenpräparate stellt sich heraus, daß das sogenannte Silberlinienmuster durchaus nicht überall uniform ist. Ist das Muster beim Omentum majus noch verhältnismäßig grobmaschig, so finden sich an der Innenwand der Gefäße häufig eng beieinander liegende, spitz oder rautenförmig ausgezogene Maschen mit spindelförmigen Kernen, deren Längsachse der Richtung des Gefäßverlaufes folgt (Casparis 1919; Zimmermann 1923; Benninghoff 1930; Hellman Lund 1930; Garbarsch et al. 1970; Drecolli-Lütjen et al. 1970; Dahm et al. 1973). Allerdings "braucht die Längsachse nicht genau in der Längsrichtung des Kapillarrohres eingestellt zu sein, die Zelle kann auch schräg stehen und sich in einer halben Spiraltour um das Rohr winden. An den Enden können sich die Endothelien in mehrere Zipfel spalten. An den Venchen werden die Zellen kürzer, unregelmäßig polygonal" (Benninghoff 1930). Nach Zimmermann (1923) und Casparis (1919) unterscheiden sich die Silberlinien des Endothels arterieller, venöser und lymphatischer Gefäße deutlich voneinander. Das Endothel arterieller Gefäße besitzt schmale, gestreckte und spitz

auslaufende Zellen, während das der venösen Gefäße kleinere, kürzere und häufig unregelmäßig polygonale Endothelzellen aufweist (Casparis 1919; Zimmermann 1923; Hellmann Lund 1930; Christensen 1972; Asmussen 1975; eigene Beobachtungen).

Die bisher beschriebenen Befunde lassen den Schluß zu, daß die Endothelien innerhalb der Gefäßachse eine bestimmte, stets wiederkehrende Orientierung haben.

Damit erhebt sich die Frage nach dem funktionellen Sinn einer solchen Strukturierung. Es liegt nahe, anzunehmen, daß die Ausrichtung der Endothelzellen den jeweiligen intraluminalen Strömungen entspricht, d.h. den Strömungsverlauf widerspiegelt.

Für eine Prüfung dieser Frage bietet sich besonders die Innenauskleidung des Herzens an. Am Endokard sind nach Untersuchungen von Rushmer (1970), Taylor et al. (1970) und Belhouse (1970⁷²) nicht nur laminare Strömungen, wie sie im Kreislauf vorherrschen, sondern auch turbulente und spiralförmige Strömungen beobachtet worden, die auf das Endothelmuster einen Einfluß haben müßten, würde die oben skizzierte Hypothese richtig sein (Schultz et al. 1968; Belhouse 1968/1969; Gauer et al. 1972).

Wir haben daher das Zellmuster des Endothels in den verschiedenen Herzräumen an großflächigen Häutchenpräparaten unter funktionellen Gesichtspunkten erneut untersucht. Die technischen Schwierigkeiten dabei sind nicht gering (vgl. auch Sinapius 1952/1956; Buss 1973). Einerseits treten leicht Artefaktbildungen bei der Herstellung derartiger großflächiger Häutchenpräparate auf, andererseits ergeben sich aber auch allein schon durch die makroskopische Struktur der Herzräume, besonders in den trabekulären Abschnitten der Vorhöfe und Ventrikel, Schwierigkeiten bei der flächenhaften Darstellung der endothelialen Oberflächen über einen größeren Bereich hinweg.

Die bisherigen Befunde über die Oberflächenstrukturen des Endokards und den Feinbau der endokardialen Innenauskleidung des Herzens geben zwar erste Hinweise auf die allgemeine Architektur dieser Strukturen, lassen aber keine gültigen Schlüsse über die funktionelle Struktur des gesamten Endokards, insbesondere im Hinblick auf das Strömungsmuster der Herzinneuhaut, zu. Hierzu sind Untersuchungen an größeren Oberflächen sowie Vergleiche über die regionalen Unterschiede im Endothelzellmuster erforderlich. In der vorliegenden Arbeit wird versucht, diese Aufgabe durch kombinierte Anwendung licht- und

rasterelektronenmikroskopische Methoden zu lösen. Die erhaltenen Befunde weisen darauf hin, daß das Silberlinienbild sowohl in der Lichtmikroskopie als auch in der Rasterelektronenmikroskopie in der Tat ein Spiegelbild der intraluminalen Strömungen darstellt, und damit gut zur funktionellen Analyse herangezogen werden kann.

2. Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden an sieben Herzen 3-5 Jahre alter Hunde durchgeführt. 3 Herzen wurden intravital, 4 weitere 10-30 Min. post mortem den Tieren entnommen.

6 Herzen wurden sofort mit Sørensenpuffer (ph 7,3) 1 Herz mit Aqua dest. und 0,2%igen NaCl-Lösung durchspült, Vorhöfe und Kammern eröffnet und die noch anhaftenden Blutreste nochmals mit Sørensenpuffer abgespült. Nach Entfernung von etwa der Hälfte des Myokards wurden 5 Herzen sofort in einer 2,5%igen gepufferten Glutaraldehydlösung, 1 Herz in einer 4%igen Formaldehydlösung fixiert.

Für die Silberimprägnation wurden von 2 Herzen die Vorhöfe und Kammern in 1x2 cm große Stückchen zerlegt und ihre Lage im Herzen sorgfältig notiert. Bei den übrigen Präparaten wurde das Endokard mit einer Schere vom Myokard abgetrennt und in 2x6 cm große und etwa 3 mm dicke Stückchen unterteilt, die dann zur weiteren Behandlung auf Korkplättchen aufgespannt wurden.

1 Herz wurde in entsprechender Weise, ohne vorherige Fixation, präpariert. Bei diesem Herzen erfolgte die Fixation erst nach Imprägnation mit Silbernitrat (Vorversilberung). Die Stückchen wurden bis zur wei-

teren Bearbeitung in einer gepufferten Saccharose-lösung bei 4-8°C, das vorversilberte Herz nach Fixation in 2,5%igen Glutaraldehydlösung in einer 50%igen, ebenfalls gekühlten, Aethylalkohollösung aufbewahrt.

2.1. Lichtmikroskopische Methoden

Die in der Saccharoselösung aufbewahrten und damit "dechlorierten" Gewebestückchen (Achard u. Arnaud 1906; Sinapius 1955) wurden zur Vorbereitung der Silberimprägnation (Nachversilberung) zunächst noch in einer gekühlten 0,2%igen NaCl-Lösung erneut gespült und damit wieder "rechloriert" (s.ausf. Sinapius 1955). Dieser Prozeß dauert etwa 80-100 Min. Die re-chlorierten Gewebestückchen wurden anschließend sofort mit einer 0,5%igen AgNO_3 -Lösung bei Tageslicht für etwa 15-20 Sek. imprägniert. Die anschließende Reduktion wurde mit Hilfe eines Filmentwicklers (Ultrafin) durchgeführt und dann durch Eintauchen in 50%igen Aethylalkohol gestoppt. Bei einigen Gewebestückchen wurde anschließend noch eine Kernfärbung mit Haematoxylin durchgeführt.

Für die lichtmikroskopische Untersuchung wurde die Dicke der Gewebestückchen mit Hilfe eines Gefrier-mikrotoms je nach Oberflächenbeschaffenheit auf 200-1500 μm reduziert. Die Präparate wurden dann wieder auf Korkplättchen aufgespannt, durch die aufsteigen-

de Alkoholreihe dehydriert und anschließend auf Objektträgern ausgebreitet und mit Depex eingedeckt.

Das Silberlinienmuster wurde dann mit dem Zeichentubus des Forschungsmikroskops M20 (Wild-Leitz) bei schwacher Vergrößerung nachgezeichnet, oder mit dem Fotomikroskop (Zeiss) photographiert. An den vergrößerten Mikrophotos wurden dann Länge und Breite der Endothelzellen in den verschiedenen Abschnitten des Herzens bestimmt.

2.2. Rasterelektronenmikroskopische Methoden

Einige der mit Silbernitrat imprägnierten Stückchen wurden nach Dehydrierung in der aufsteigenden Alkoholreihe in Aceton überführt, luftgetrocknet bzw. im Criticalpoint-Gerät getrocknet und anschließend für die REM-Untersuchung präpariert. Außerdem wurden aus allen Bereichen des Herzens nicht silberimprägnierte Stückchen nach Fixation in 2,5%iger Glutaraldehydlösung und Auswaschen in gepufferter Saccharoselösung in 1%iger Osmiumlösung nachfixiert und dann mit Alkohol und Aceton dehydriert und dann in gleicher Weise für die REM-Untersuchung vorbereitet. Alle Präparate wurden vor der Einschleusung in das Cambridge-Stereoscan-Mikroskop mit Gold bedampft und sorgfältig orientiert.

An den REM-Aufnahmen wurde ebenfalls der Längs- und Querdurchmesser der jeweiligen Endothelzellen gemessen und mit den Werten der mit Silbernitrat dargestellten Zellgrenzen verglichen.

3. Ergebnisse

Alle Herzhäume sind von einer geschlossenen Endothelschicht ausgekleidet. Durch die Silberimprägnation entsteht ein charakteristisches Linienmuster, dessen Hauptlinien (besonders deutlich bei einer Nachversilberung) in der Regel eine fischzugartige Ausrichtung, zum Teil auch wirbelartige Anordnungen zeigen. Stellenweise fehlt auch eine bevorzugte Verlaufsrichtung. In den glattwandigen Herzabschnitten überwiegen jedoch meist die ausgerichteten Zellbereiche.

Durch die vielen Vorsprünge, Nischen und Unebenheiten ergeben sich Besonderheiten. Entweder ziehen die Zellen in paralleler Anordnung über die Unebenheit der Herzwand hinweg, - ab und zu unterbrochen durch unregelmäßige Strukturen - oder die parallele Ausrichtung der Zellen wird gänzlich aufgehoben, d.h. die Zellen ordnen sich den örtlichen Gegebenheiten entsprechend an, dringen in kleine Ausbuchtungen oder gefäßähnliche Ostien vor und verlaufen zwischen den Trabekeln, Mm. papillares oder Chordae tendineae teilweise in unregelmäßiger Anordnung, teilweise auch in regelmäßiger Form.

3.1. Die Endothelstrukturen des Endokards

Nach Anwendung unserer Silberimprägnationsmethode zeigte sich am Endokard des Hundeherzens ein mehr oder weniger regelmäßiges, die Herzzinnenräume vollständig überziehendes Muster dünner Silberlinien. Dieses Muster stellt die Konturen von Endothelzellen dar, deren Form und Richtung sich in den verschiedenen Herzzräumen wesentlich ändert. So fanden wir neben schmalen länglichen Endothelzellen auch rhythmisch-palisadenförmige Linienmuster, die den verschiedenen geformten Oberflächen folgen und mit glatten, bzw. mehr oder weniger gekräuselten (verzahnten) Randkonturen versehen sind. Andere Zellen sind wiederum mehr rundlich, polygonal, pflastersteinartig oder ohne Form angeordnet. Schließlich stellen sich auch stark verzweigte, einem Puzzlespiel ähnelnde Bereiche dar. Wenn man nun die einzelnen Zellen ihrem längsten Durchmesser und nicht der Kernorientierung nach beurteilt, so fällt auf, daß in den einzelnen Herzzinnenräumen eine gewisse Systematik in der Orientierung der Zellen zu erkennen ist, die im folgenden beschrieben werden soll.

3.1.1. Rechter Vorhof

Die Endothelien der zuführenden Venen zeigen im

Silberimprägnationsbild ein gleichmäßiges, längs ausgerichtetes Linienmuster. Es handelt sich um Zellen, welche länger als breit sind und teils spitz, teils stumpf enden und ineinander übergehen.

Im herznahen Bereich der Vena cava inf. ist das Linienmuster, dem längsten Durchmesser nach beurteilt, parallel zum Axialstrom ausgerichtet. Diese Richtung wird bis ca. 1 cm unterhalb des Limbus beibehalten (Abb. 1 u. 2). Dann ändert sich das Bild, indem die Zellen nunmehr von dorsal nach ventral einen Bogen beschreiben und nach medial zur Valva atrioventricularis dextra (cuspis posterior) und nach lateral über die Valvula v. cavae inf. zur Wurzel des rechten Herzohres und weiter zum Herzohr, sowie abzweigend bogenförmig zur den Valvae atrio-ventriculares dextr. (cusp.post. et cusp.ant.) verlaufen (Abb. 1). Der Bereich der Valvula sinus coronarii zeigt lokal eine mehr herdförmige Anordnung, welche in einiger Entfernung zum Ostium in die vorherrschende Vorhofanordnung übergeht.

Etwas unterschiedlich hierzu verhält sich das Endothel in der Vena cava sup.. Vor Eintritt in den rechten Vorhof verlassen die Endothelzellen ihre vordem paraxiale Ausrichtung und nehmen jetzt eine kranio-dorso-mediale bis ventro-kaudo-laterale Verlaufsrichtung an. In der Synopsis erscheint das Linienmuster

wie eine linksdrehende Halbspirale. Diese Richtung wird bis zum Eintritt der Vena cava sup. in den Vorhof beibehalten, ändert sich dann aber, indem die Zellen nunmehr nach medio-ventral in Richtung Herzohr verlaufen.

In Vorhofmitte stoßen die Zellströme beider Richtungen (Vena cava sup. et inf.) zusammen und vereinigen sich zu einer gemeinsamen Verlaufsrichtung. Dadurch entsteht hier eine dorso-ventrale Zone, welche richtungsmäßig weniger streng orientiert ist. Aber schon vor Eintritt in die atrio-ventrikuläre Einstrombahn zeigen die Zellen wiederum eine gleichmäßigere Ausrichtung. Im Bereich des Foramen ovale und der Valvula sinus coronarii ist eine örtliche Desorientierung im Verlauf der Silberlinien festzustellen. Eine Beziehung zur Hauptströmung in Richtung auf die Herzklappen ist nicht zu erkennen. Die Pectinatusregion und das Herzohr mit seinen in das Lumen vorspringenden Muskelbalken und den dadurch entstehenden Nischen läßt ebenso eine strenge Orientierung der Zellen vermissen. Die eher fischzugartige Konfiguration großer uniformer Bereiche länglicher Zellen weicht in dieser Region einem mehr pflastersteinartigen Linienmuster mit polygonalen oder ku-

bischen Formen. Morphometrisch ist es häufig schwer, eine Längsachse zu erkennen. Die Zelldichte nimmt in diesen Bereichen, besonders bei trichterförmigen Einengungen in den von Muskelbalken überdeckten Nischen, zu. Zur Ventilebene hin, wo die Herzwand wiederum mehr ebenmäßig und glatt strukturiert ist, sind die oben beschriebenen fischzugartig angeordneten, länglichen Endothelzellen, differenziert (Abb. 1 u. 2).

3.1.2. Rechter Ventrikel und A.V. Klappenapparat

Das Klappenendothel imponiert durch ständig wechselnde Formänderungen seiner Endothelzellen, die eine konstante Ausrichtung im Gegensatz zu den Zellen im Vorhofbereich nicht erkennen lassen. Lediglich an der Ausstrombahn in der Nähe der Valva atrioventricularis (cuspid septalis) finden sich umschriebene Bereiche mit mehr oder weniger ausgerichteter Endothelanordnung (Abb. 3 u. 4).

Die Form des Klappenendothels ist meist polygonal, kubisch oder pflasterartig. Von den Klappenwurzeln bis hin zu den Rändern und den Chordae tend. nimmt die Zellgröße ab und die Zelldichte zu. Die Chordae tend. sind dicht von einem pflastersteinartigen Endothelbesatz bedeckt (Abb. 5 u. 8 a-c). Die Zellen unregel-

mäßig polygonal geformt, teilweise auch kubisch, weisen eine bei allen Sehnenfäden in typischer Weise wendeltreppenartige oder spiralige Anordnung auf. Der Übergang zu den Mm. papillares gestaltet sich nun wiederum umgekehrt wie bei den Übergängen von den Klappen zu den Sehnenfäden. Aus den kleinen polygonalen Endothelzellen werden hier wieder schmale bis etwas breitere Zellen, die eine unterschiedliche Länge aufweisen. Der dichte Besatz kubischer bis polygonaler Zellen an den Sehnenfäden erstreckt sich auch auf die seitliche Papillarmuskulatur und setzt sich weiter nach distal und lateral in das Trabekelwerk fort. Auf den glatten Anteilen der Mm. papillares findet sich darüber hinaus ein wechselweise teilkranio-kaudales und teilweise auch ein quer dazu verlaufendes Endothelmuster, welches zudem auch, was Formvielfalt und Richtung betrifft, Größe und Form ständig ändert. Beim Verfolgen eines bestimmten Abschnittes stellt man allerdings dann fest, daß auch hier eine klare Ausrichtung des Silberlinienbildes zu erkennen ist. Die ständig wechselnden Oberflächen (Nischen, Spalten und rundliche Öffnungen) zwingen das Endothel zu häufigen Richtungsänderungen.

Auffallend dabei ist, daß vorher noch plumpe, abge-

rundete, längliche Zellen plötzlich dann in schmale, längliche oder mehr fusiforme Zellen verformt werden und z.B. auf eine Verengung ausgerichtet sind. Nach Überwindung der Enge wird die vorherige Anordnung mehr plumper, runder Zellen wieder aufgenommen (Abb. 6 u. 9). Die Endothelzellen in den ausgedehnten retro-trabekulären und vor allem auch in den intra-myokardialen Reserveräumen weisen gegenüber den bisher beschriebenen Formen Besonderheiten auf. Die auf den Klappen, Sehnenfäden und der Trabekelmuskulatur liegenden Endothelien und auch diejenigen der Vorhöfe, unterscheiden sich deutlich von den mehr bizarren mit mehreren Fortsätzen versehenen, großen Zellformen dieser Gebiete, deren Zellgrenzen einem Puzzlespiel nicht unähnlich sind. Die mehr glattwandigen Abschnitte der Einstrombahn in der rechten Kammer, welche nicht von den Segeln der Valva tricuspidalis verdeckt sind, weisen ein Silberlinienmuster auf, das dann wiederum eine bevorzugte Ausrichtung erkennen läßt. Es finden sich kleine ovaläre bis längliche Zellen, die die laterale und ventrale Ventrikelwand dicht besetzen (Abb. 7). Über große Flächen ist eine Richtung der Linien von latero-kranial nach medio-kaudal in Form einer zum Septum hin konvexen linksdrehenden halben Spirale zu erkennen. Lediglich dort, wo örtliche Bedingungen

eine Änderung dieser Richtung verlangen, gibt es Abweichungen (Trabeculae corneae, Nischen usw.). Auf den makroskopisch sichtbaren, glatten Anteilen der Ausstrohmbahn findet sich ein sehr strenges Zellmuster, das aus vorwiegend parallel liegenden, palisadenförmigen, langgestreckten Endothelzellen besteht. Die Hauptrichtung ist hier deutlich zu erkennen, da Unebenheiten, Falten oder Nischen nicht vorhanden sind (Abb. 10). Die Längsrichtung der einzelnen Zellen weist von kaudo-ventro-lateral nach kranio-dorso-medial (septal), so daß eine rechtsdrehende Halbspirale ausgebildet wird, deren konvexer Anteil dem Septum aufliegt. Die an der lateralen und ventralen Kammerwand beschriebenen Endothelpopulation hat im Vergleich zur Ausstrombahn eine wesentlich dichtere und damit größere Zellzahl im Vergleich zur Ausstrombahn (s.a. morphometrische Befunde). Die Formen der Endothelzellen sind in der Ausstrombahn gekräuselt und länglich gestreckt und gehen mal rundlich, mal spitz verzahnt, ineinander über. Erst vor der Ventilebene findet sich wieder eine unregelmäßige herdförmig und nicht ausgerichtete Zellanordnung. Die Endothelmuster auf den Taschenklappen (Valvae trunci pulmonalis) gleichen denen,

die an den Aortenklappen zu beobachten sind, so daß diese erst dort besprochen werden sollen.

In der A. pulmonalis findet sich im Gegensatz zur proximalen Aorta keine streng ausgerichtete Orientierung der Endothelzellen, obgleich diese weitgehend dem Gefäßverlauf folgen. Die Intima der A. pulmonalis besteht aus vorwiegend langgestreckten, schmalen, dicht nebeneinander liegenden Endothelzellen, deren Zellgrenzen einmal mehr wellenförmig, einmal mehr wirbelartig, an den Enden teilweise zipfelig, ineinander verzahnt sind.

3.1.3. Linker Vorhof

Das Endothel der Venae pulmonales im Bereich der Vorhofeintrittsstelle ist paraxial ausgerichtet. Nach Eintritt in den linken Vorhof verteilen sich die in Form länglicher, dicht nebeneinander liegenden Zellen ziemlich gleichmäßig über die laterale und mediale Vorhofwand. Wie auch beim rechten Vorhof zu beobachten, weist die Generalrichtung der Zellen auf das a.-v. Ostium hin. Insgesamt zeigen die einzelnen Zellen auch hier eine Verlaufsrichtung, welche lateral bogenförmig zur Pectinatusregion und medial zur Spitze des Herzohres weist. Von dieser Richtung weichen nur die regelmäßig zu den Klappen (Ventilebene) hinführenden Endothelzellen ab (Abb. 11-13).

Die Uniformität der Zellen wird im Bereich der Pectinatusmuskulatur und des linken Herzohres, ähnlich wie im rechten Herzohr, durch polygonale, kubische, dicht an dicht liegende Zellen ersetzt. Hinsichtlich Form und Größe dieser Zellen ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Endothelzellen des rechten und linken Vorhofes. Eine bevorzugte Ausrichtung der Zellen ist auch in der Pectinatusregion, wie schon im rechten Vorhof, zu erkennen.

Die ansonsten im gesamten Vorhof zu erkennende Ausrichtung der Endothelzellen auf die Ventilebene verändert sich im Bereich der Fovea ovalis so, daß sich eine quer zur Hauptrichtung orientierte Endothelanordnung ergibt. In einigem Abstand vor und hinter dem Foramen ovale zeigt sich jedoch wieder die vorherrschende Richtung. Im Bereich der Pulmonalvenenmündung läßt sich ebenfalls zunächst eine gewisse Desorientierung der Silberlinien erkennen, die herdförmig wirbelartig in Richtung der Klappen, jedoch dann wieder gleichmäßiger ausgerichtet sind.

3.1.4. Linker Ventrikel und A.-V. Klappenapparat

Hinsichtlich Form und Anordnung der Endothelzellen fanden sich keine prinzipiellen Unterschiede zwischen den Mitral- und Trikuspidalklappen. Das vom Vorhof kommende, gut ausgerichtete Endothel verliert im Klappenbereich sofort seine Ausrichtung und seine vorherige Gestalt. Die Zellen werden mehr und mehr polygonal bis kubisch, ohne daß eine eindeutige Ausrichtung des Längsdurchmessers der Zellen zu erkennen ist (Abb. 14a,b,u.21). Zum Klappenrand hin werden die Zellen kleiner und bedecken pflastersteinartig die Oberflächen. Sie gehen auf die Sehnenfäden über, um dann auf der Papillarmus-

kulatur wieder größer zu werden. Auf den der Einstromseite entgegengesetzten Seiten der Mitralklappen findet sich ein, den örtlichen Gegebenheiten entsprechend angepaßtes, wenig ausgerichtetes polygonales und sternförmiges Endothel (Abb. 15).

Ein wesentlicher Unterschied besteht lediglich auf der beim Mitralklappenverschluß der Ausstrombahn zugeneigten Seite des *cuspis ant. valvae mitralis*. Hier fanden sich große Areale mit einem gut orientiertem Endothel.

Der Endothelbesatz der *Chordae tendineae* besteht, ähnlich wie im rechten Ventrikel, aus polygonalen bis kubischen Zellen. Häufig zeigt sich eine spiralige Anordnung. Im Bereich der lateralen und ventralen Ventrikelwand, wenn nicht durch das Maschenwerk der Trabekel andere Verhältnisse vorliegen, kann man deutlich einen mehr oder weniger gerichteten Endothelbelag feststellen (Abb. 16). An den glatten Abschnitten der ventralen Ventrikelwand finden sich wieder ausgerichtete Endothelformen. Die Papillarmuskulatur, sowie das Maschenwerk der Trabekel, zeigen eine sehr eigenwillige Orientierung der Längsdurchmesser der Endothelien. So sieht man neben Arealen mit polygonalen, nicht ausgerichteten Zellen

auch Felder, wie z.B. in der Nähe von Nischen und an Eingängen zu den Gefäßostien, oder zu den retrotrabekulären Räumen häufig polymorphe Zellen, deren Zytoplasma sich peripherwärts verjüngt und die z.Tl. besonders dicht beieinander liegen, so, als wollten sie sich alle zugleich in die Enge zwängen (vgl. Abb.9). Die an den glatten Abschnitten der ventralen Ventrikelwand und an den Papillarmuskeln zu erkennenden, ausgerichteten Endothelien, beschreiben eine rechtsdrehende Halbspirale.

Im Übergangsgebiet zur Ausstrombahn kommen wieder völlig unorientierte Zellen mit vielfachen Gestaltveränderungen vor, welche sich dann auf dem glatten Septum mehr und mehr in Richtung Aortenklappen ausrichten, und schließlich wieder streng rhythmisch und palisadenförmig nebeneinander angeordnet sind (Abb. 16-18 u. 20). Die Zellformen werden länglicher und schmaler, die Polenden spitz und abgerundet. Kurz vor dem Aortenklappenbereich hebt sich diese Anordnung wieder auf. Es entstehen herdartige Wirbel bis zum Klappenansatz. Die Ausrichtung auf dem Septum ist in etwa auch auf der freischwingenden, in der Systole die laterale Wand des Ausstromkanals mitbildenden, anterioren Mitralklappe zu erkennen. Die Zellen der

Aortenklappen und Umgebung sind wieder polygonal, rundlich bis kubisch und pflastersteinartig. Lediglich an den Ansätzen und in den Taschenräumen der Aorta finden sich wirbelartig angeordnete längliche Zellen. Von Klappenwurzel bis Klappenrand werden die Zellen zahlreicher (weil kleiner) und bilden ein Mosaik dicht beieinander liegender Zellen auf beiden Seiten der freischwingenden Klappen. Im Bereich der Noduli Arantii findet sich eine Zellform besonderer Art. Wie Zwiebelschalen winden sich, im Kontrast zu der mosaikartigen Umgebung, lange schmale und spitze Zellen um das Knötchenzentrum herum und passen sich damit der eigenartigen Form dieser Gewebsverdichtung an (Abb. 19).

Das Endothel der Aorta ascendens zeigt kurz nach der Klappenebene eine strenge Ausrichtung langer und sehr schmaler, spitz ineinander übergehender Zellen. Die Orientierung ist auf die Ostien der Gefäßabgänge ausgerichtet. Die Längsdurchmesser der Zellen weisen in Stromrichtung. An den seitlichen Ansätzen der Taschenklappen und auf der proximalen Aorta, hinter den Klappen, erkennt man eine wirbelartig geformte Endothelanordnung. Die Zellen sind einerseits vieleckig bis kubisch, andererseits auch wieder schlank, lang und fusiform. Sie biegen schon

am Klappenansatz in den Raum hinter den Klappen ein und bilden hinter den Klappen verwirbelte Anordnungen, welche sich erst distal von der Ventilebene auf der Aorta wieder vereinigen und der Längsachse des Gefäßes entsprechend ausrichten (Abb. 27).

3.2. Die intraendokardialen und subendokardialen Gefäße und Nischen

Bei der transmyokardialen Präparation des Ventrikelendokards fallen flache Hohlräume auf, welche innerhalb der Muskulatur liegen und ebenfalls mit einer Endothelschicht ausgekleidet sind. Man erkennt ein Endothelmuster, dessen Grenzlinien rundlich, viieleckig oder vielfach verzahnt verlaufen. Die Linien sind den Schnittkanten eines Puzzlespiels nicht unähnlich. Die Hohlräume haben, über im Maschenwerk der Muskelbalken gelegene kleine Ostien, Verbindung zum Lumen der Ventrikel. Die Ventrikelendothelien zweigen zu den Öffnungen ab und zwingen sich in großer Anzahl durch diese Spalten und Nischen hindurch. Nach Passieren dieser Engen breiten sich die Zellen dann rasch wieder aus und formen ein Endothelmuster, dessen Grenzlinien typisch für diese Hohlräume sind (vgl. a. Abb. 9).

Unabhängig von diesen Hohlräumen existieren noch subendokardiale Gefäßstraßen, deren Endothel sich erst nach längerem Einwirken von AgNO_3 deutlich anfärbt. Diese finden sich vorwiegend auf der Papillarmuskulatur und im Maschenwerk der Trabekelmuskulatur der Herzspitze (Abb. 22-26). An Orten, wo die Endothelzellen des Endokards abgeschilfert, oder

bei der Präparation entfernt werden, kann man besonders in der Nähe der Papillarmuskeln und der Herzspitze (in der rechten Kammer häufiger als in der linken) eigenartige, verzweigte Endothelmuster erkennen. Die Zellen sind auffallend lang (bis zu 120 μm) und können eine Breite bis zu 20 μm betragen. Die subendokardialen Gefäße sind in der Regel stark verzweigt und enden nicht selten blind im subendokardialen Gewebe. Einzelne Gefäße können eine Breite bis zu 200 μm besitzen. Klappenähnliche Einrichtungen scheinen vorhanden zu sein.

3.3. Morphometrische Befunde

An allen typischen Herzorten wurden die Zellgrößen des Endothels nach Silberimprägnation am Zeichenmikroskop gemessen. In der Regel wurden die Länge und Breite der Einzelzellen bestimmt und der Mittelwert von 100 Einzelmessungen in Tabelle 1 mit der Standardabweichung eingetragen. Die Meßdaten zeigen deutlich, daß die Endokardendothelien in der überwiegenden Mehrheit länger als breit sind. Signifikante Unterschiede zwischen den Endothelzellen der Vorhöfe und Kammern, etwa im Bereich von Ein- und Ausstrombahn oder zwischen dem rechten und linken Herzen, ließen sich jedoch nicht feststellen. Lediglich im Bereich der großen Arterien, vor allem der Aorta, fanden sich größere Endothelzellen. Die Umwandlung in großflächigere Zellen wird bereits im Bereich der Ausstrombahn deutlich, wo eine Tendenz zu einer Zellvergrößerung, vor allem im Vergleich zu den entsprechenden Zellen der Einstrombahn, erkennbar ist.

Abweichende Werte sind nur bei den subendokardialen Gefäßen festzustellen, deren Endothel eine Länge von durchschnittlich 80 μm erreicht. Dies kann als ein Hinweis darauf gewertet werden, daß es sich bei diesen Strukturen nicht um endokardiale Elemente handelt.

Tabelle 1 - Übersicht über die Meßwerte von den Größenverhältnissen der Endothelzellen des Hundeherzens. L = Größte Länge, B = größte Breite der Zellen. Durchschnittswerte von 100 Messungen.

Lokalisation	Rechtes Herz Mw $\pm$ σ	Linkes Herz Mw $\pm$ σ
Vorhöfe	L: 39,75 $\pm$ 7,02 B: 12,83 $\pm$ 5,01	L: 32,34 $\pm$ 6,25 B: 11,39 $\pm$ 6,65
Kammern lat. Einstrombahn	L: 31,66 $\pm$ 12,73 B: 13,78 $\pm$ 5,05	L: 26,35 $\pm$ 8,76 B: 11,58 $\pm$ 3,63
Kammern med. Ausstrombahn	L: 42,15 $\pm$ 6,66 B: 8,81 $\pm$ 3,13	L: 44,44 $\pm$ 10,44 B: 10,12 $\pm$ 4,07
Papillarmuskeln	L: 46,59 $\pm$ 13,97 B: 14,6 $\pm$ 3,88	L: 30,52 $\pm$ 25,5 B: 8,85 $\pm$ 2,34
Sehnenfaden li.		L: 28,6 $\pm$ 4,29 B: 10,95 $\pm$ 2,37
Mitralklappe (Einstrombahn)	proximales Drittel mittleres Drittel distales Drittel	L: 35,5 $\pm$ 4,01 B: 23,71 $\pm$ 4,74 L: 46,7 $\pm$ 9,05 B: 10,58 $\pm$ 2,53 L: 21,9 $\pm$ 2,02 B: 9,6 $\pm$ 1,01
Mitralklappe (Ausstrombahn)		L: 52,11 $\pm$ 8,95 B: 10,8 $\pm$ 3,19
Pulmonalklappe im Stromschatten stromseitig	L: 34,92 $\pm$ 6,83 B: 8,6 $\pm$ 2,26 L: 23,92 $\pm$ 3,54 B: 4,95 $\pm$ 1,25	
Aortenklappe im Stromschatten ausstromseitig randständig		L: 39,78 $\pm$ 9,6 B: 9,23 $\pm$ 2,23 L: 30,5 $\pm$ 4,28 B: 12,0 $\pm$ 1,41 L: 25,9 $\pm$ 8,34 B: 9,85 $\pm$ 2,46
Pulmonalarterie/ Aorta	L: 47,05 $\pm$ 14,41 B: 8,47 $\pm$ 1,57	L: 71,6 $\pm$ 8,04 B: 6,52 $\pm$ 3,6
Subendotheliales Endothel Herzspitze rechts	L: 79,8 $\pm$ 10,98 B: 9,6 $\pm$ 3,06	

4. Diskussion

Die mit der von uns modifizierten Methode der Silberimprägnation dargestellten Silberlinien an den Endothelzellen des Hundeendokards entsprechen weitgehend den bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung sichtbaren Zellgrenzen. Die Silberlinien sind dicker (nach Garbarsch und Christensen (1972) durchschnittlich $1\text{ }\mu\text{m}$), als die transmissionselektronenmikroskopisch nachweisbaren Zwischenräume zwischen den Endothelzellen, die etwa $100\text{ }\text{\AA}$ breit sind (Candiollo 1963; Fawcett 1969). Die Natur der Grenz- bzw. Silberlinien bleibt daher vorerst ungeklärt (Wheeler 1972). Problematisch wird eine Deutung vor allem auch durch die Tatsache, daß die Grenzlinien der Endothelzellen sowohl nach Silberimprägnation (Garbarsch und Christensen 1970/1972) als auch ohne entsprechende Kontrastierung im Rasterelektronenmikroskop zu erkennen sind (Wheeler et al. 1972; Buss et al. 1973; Edanaga et al. 1974; Peine et al. 1975). Linzbach et al. (1957) beobachtete im Auflicht- und mit dem Phasenmikroskop Endothelhäutchen und fand nach Antrocknung der Oberfläche ein dem Silberlinienbild ähnliches Linienmuster. Er postulierte anhand eines Modells, daß nach dem Trocknungsvorgang anein-

ander grenzende periphere Endothelstrukturen stehenbleiben und scharfe Linien erzeugen. Sinapius (1955) erklärt demgegenüber die Silberniederschläge durch zentrifugal zunehmende Adsorptionsprozesse. Hypothetisch ist es denkbar, folgt man Sinapius (1955), daß sich dieses (argyrophile) Adsorptionspotential an den Orten aneinandergrenzender und sich überlagernder Zellen verstärkt, und es deshalb zum initialen Ausfall von metallischem Silber kommt. Diese Vermutung wird bestätigt, wenn man im Auflichtmikroskop Häutchen betrachtet, die längere Zeit einer AgNO_3 -Lösung ausgesetzt sind. Gleichmäßig bedeckt ein Silberniederschlag die Endotheloberfläche und läßt einzelne Strukturen nicht mehr deutlich erkennen. Die Beobachtungen im Rasterelektronenmikroskop bestätigen diesen Befund. Dort sieht man, wie das metallische Silber als grobe poröse Masse den Grenzlinien aufliegt und diese verdickt. Bei Häutchenpräparaten, welche im Critical-point-Gerät getrocknet wurden, erkennt man deutlich, ohne vorherige Nachversilberung, die in das Lumen vorragenden Grenzwälle. Solche Bilder sieht man vorwiegend an ebenen oder glatten Häutchenpräparaten (Vorhöfe, Ausstrombahn).

Eine solche Erklärung würde auch verständlich machen, weshalb nach einer Silberimprägnation die Silberlinien mit der Fingerbeere entfernt werden können und die Endothelzelle mit Kern noch erhalten bleibt (Sinapius 1955; Linzbach 1957). Es handelt sich also unserer Meinung nach bei den im Durchlicht-, Auflicht- oder Phasenmikroskop, bzw. im Rasterelektronenmikroskop erhaltenen Linien mit großer Wahrscheinlichkeit um die Zellgrenzen der Endothelien. Über die Natur der Interzellularstrukturen (Interzellulärsubstanz, Kittlinien, Zement usw.) sagt die Methode allerdings nichts aus (s.a. Sinapius 1955). Zur Beurteilung von Oberflächenstrukturen, Endothelmodifikationen, Regenerationsvorgängen oder pathologischen Phänomenen kann sie aber gute Dienste leisten (Sinapius 1952; Gottlob et al. 1962; Dreccoll et al. 1970; Hirsch et al. 1976).

Wahrscheinlich behalten auch nach der Fixation die Endothelien ihre Lage zueinander weitgehend bei. Durch die Fixation verdichtet sich die Oberfläche. Bei der Dehydratation kollabieren dann die tiefergelegenen Strukturen und die Endotheloberfläche senkt sich bis auf den Kern und die Zellorganellen ein. An den zum Tl. überlappenden Kontaktstellen der Zellen bleibt, bedingt durch zweiseitigen Zug, ein Rest stehen, der vielleicht die Grenzlinien hervorruft, die man im Rasterelektronen-

mikroskop sieht. Der Vergleich mit einem Zelt drängt sich auf, dessen Stützen fixiert sind und dessen seitliche Planenverspannung eingefallen ist. Zurück bleibt dann nur eine von den Stützen gehaltene Wand. Diese Hypothese könnte auch erklären, weshalb die im Rasterelektronenmikroskop zu beobachtenden Grenzwälle bis zu 1 μm dick werden, während die elektronenmikroskopischen Beobachtungen nur einen interendothelialen Zwischenraum von rund 100 Å ergeben. Die nach Fixation und Dehydratation zurückbleibenden "Erhebungslinien" würden somit aus dem Interzellularraum und den beiden angrenzenden Zellmembranen, sowie den im Rasterelektronenmikroskop zu beobachtenden überlappenden Grenzwällen bestehen. Wieweit sich diese Hypothese verifizieren läßt, müssen zukünftige Untersuchungen zeigen.

Überblickt man die in den verschiedenen Regionen der Herzzinnenräume beobachteten Endothelzellenmuster als Ganzes, so ergibt sich eine auffallende Übereinstimmung mit den jeweiligen Strömungsverhältnissen (Rushmer 1970).

Betrachten wir zunächst die endothelialen Endokardstrukturen im rechten Herzen (Abb. 1, 7u. 10). In den beiden Hohlvenen findet sich ein vornehmlich längsausgerichtetes Endothel. Die langgestreckten Zellen liegen in

Stromrichtung und besonders im Bereich der oberen Hohlvene im Sinne einer linksdrehenden Halbspirale etwas gedreht.

Im glattwandigen Vorhofbereich tritt dann ein anderes Silberlinienmuster auf. Die Zellen zeigen hier mehr plumpere Formen und eine vornehmlich horizontale, z.T. auch unregelmäßige Ausrichtung. In Richtung auf das Ostium atrioventriculare stellt sich dann wieder eine gleichmäßigere parallele Zellordnung ein, die im Bereich des Herzohres dann einer ganz unregelmäßigen Struktur Platz macht. In den glattwandigen Ventrikelabschnitten der Ausstrombahn sind sehr langgestreckte Zellen zu finden, die relativ gleichmäßig nebeneinander liegen und mit einer leicht spiralgigen Tendenz der Stromrichtung des Blutes folgen. In den Nischen zwischen den Trabeculae corneae und an der Einstromseite herrschen dagegen wieder unregelmäßige Muster vor. Ein unregelmäßiges mosaikartiges Muster findet sich besonders an den Stellen, an denen ausgiebigere Bewegungen vorkommen. Bezeichnenderweise sind die Endothelmuster an der Ober- und Unterfläche der Segelklappen verschieden, was gut mit den unterschiedlichen Strömungsverhältnissen an beiden Seiten dieser Klappen übereinstimmt. Ähnliche Verhältnisse liegen auch im linken Herzen vor (Abb. 11, 18). Eine Drehung des Linienmusters ist hier allerdings nicht so deutlich zu erkennen. Die parallele Ausrichtung der Endothelzel-

len in der Stromrichtung der Ausflußbahn beginnt interessanterweise erst im mittleren Drittel der Ausstrombahn.

Insgesamt zeigt sich damit nach Art eines Spiegelbildes das jeweilige Strömungsgeschehen im Herzen am Endothelmuster. An Orten turbulenter Strömung herrscht ein unregelmäßiges Silberlinienmuster vor, während in der Ein- und Ausstrombahn eine parallele Anordnung der Zellgrenzen zu erkennen ist, wo laminare Strömungen erwartet werden. Die beobachteten Hauptströmungen sind in Abb.7,10 und 17 dargestellt.

Untersuchungen von Strömungen und Geschwindigkeitsprofilen anhand von Schafs- und Hundeherzen und von Herzmodellen decken sich weitgehend mit den gefundenen Endothelausrichtungen (Bellhouse et al. 1969; Rushmer 1970; Taylor et al. 1970). Im rechten Herzen fand sich eine torquierte Strömung im Sinne einer Linksdrehung. Beim Passieren der Ventilebenen (gilt für Trikuspidal-, Mitral- und Semilunarklappen) sind die Strömungen so stabilisiert, daß wenig Turbulenzen auftreten. Dies wird durch Stellen der flottierenden Segel über stabile Wirbelbildung im Stromschatten bewerkstelligt. In der späten Diastole treten jedoch wieder einige laterale Turbulenzen auf.

Wegen der Schwierigkeiten der Darstellung von Strömungen in den Ventrikeln ist über isolierte Strömungen in der Ausstrombahn, abgesehen von denen der Ventilebene, bisher nichts bekannt geworden. Die makroskopisch glatten Anteile der Ausstrombahnen lassen aber laminare Strömungen erwarten. Der Unterschied des Endothelbesatzes, der im linken Ventrikel ganz im Gegensatz zum rechten Ventrikel, interessanterweise eine Ausrichtung erst im mittleren Drittel erkennen läßt, mag durch stärkere Turbulenzen in der schnellen Füllungsphase, sowie durch im Vergleich höhere Druckverhältnisse in der Auswurfphase zu erklären sein. Auch werden die makroskopischen Unterschiede zwischen dem rechten (triangelförmigen) und dem linken (konischen, zylinderförmigen) Ventrikel nicht ohne Bedeutung sein.

Die Frage, wodurch diese Ausrichtung zustande kommt und welchen funktionellen Sinn sie hat, ist nicht geklärt. Vielleicht darf man im Sinne der oben beschriebenen Strömungsverhältnisse annehmen, daß die Grenzlinien zwischen den Zellen gewissermaßen "Führungsrinnen" für die Flüssigkeitsströmungen sind, ähnlich wie die Züge in einem Gewehrlauf, und damit die Stromrichtung beeinflussen können. Umgekehrt wäre auch eine

Anpassung des Endothels an die jeweiligen Strömungsverhältnisse denkbar, denn eine zufällige Anordnung der Zellen würde vielleicht die örtlichen Reibungswiderstände erhöhen und damit die Zellen mit der Zeit schädigen können. Die hohe Empfindlichkeit des Endothels auf mechanisch einwirkende Kräfte des Blutstromes ist von Fry (1969) eingehend dargestellt worden. Dafür sprechen auch Untersuchungen von Flaherty et al. (1972), in denen ein Ausrichten länglicher ellipsoider Endothelkerne in Stromrichtung beschrieben wird. Sie fanden heraus, daß sich die Endothelkerne in der Aorta vom Kaninchen paraxial ausrichten, und diese Ausrichtung nach einer gewissen Zeit auch dann wieder einnehmen, wenn operativ ein Segment herausgenommen und um 90° gedreht wieder eingepflanzt wird.

Zur Frage der funktionellen Anpassung des Endothels an die wechselnden Oberflächenverhältnisse bei Systole und Diastole können wir keine definitiven Aussagen machen, da wir keine unterschiedlichen Funktionszustände untersucht haben. Verformungen des Endothelmusters durch ein Verspannen des Endokards während der jeweiligen Kontraktions- und Dilatationszustände des Myokards sind zu erwarten.

Die intramyokardialen Hohlräume entsprechen vermutlich den intramyokardialen Strömungswegen (sog. Sinusoide), welche am hydraulischen Schwellmechanismus zur Kammerentfaltung beteiligt sind und als Kanäle zur raschen Umverteilung des hydraulischen Mediums dienen (Lunkenheimer

et al. 1973; Noack et al. 1973).

Die subendokardialen Gefäße könnten ebenfalls Reservieräume sein, die bei einer Dilatation der Herzwand in diese einbezogen werden. Da sie aber ein völlig differentes Endothelzellenmuster besitzen, und außerdem sehr stark untereinander vernetzt sind, ist es wahrscheinlicher, daß es sich hier um ein selbständiges Gefäßsystem mit eigenständiger Funktion handelt. Das charakteristische Silberlinienbild spricht eher für Lymphgefäße. Es ist jedoch auch möglich, daß diese Gefäße zum System der Thebesischen Venen oder den intramyokardialen Strömungswegen (sog. Sinusoiden) gehört (Bartel 1901, 1909).

Die morphometrischen Befunde zeigten deutlich, daß Herzorte mit stärkerer passiver und aktiver Beweglichkeit eine höhere Zelldichte besitzen. Buss et al. (1973) fand ähnliche Verhältnisse nach Auszählungen der Endothelzellkerne des Endokards von Ratten. Er diskutierte die höhere Zellzahl als Ausdruck einer gewissen Endothelreserve zum Ausgleich der diastolisch-systolisch wechselnden Größe der Oberfläche. Möglicherweise liegt hierin auch die Begründung für die Vielfalt der Formen und für die herdförmige Umordnung der Endothelzellen im Silberbild vor (vgl. auch Lunkenheimer et al. 1973).

5. Zusammenfassung

Häutchenpräparate vom Endokard 3-5 Jahre alter Hunde wurden sowohl mit als auch ohne vorherige Silberimprägnation nach einer von uns modifizierten Methode licht- und raster-elektronenmikroskopisch untersucht.

Die Herzendothelien wurden nach Gestalt und Lage im Hinblick auf die funktionellen Gegebenheiten analysiert. Es ergab sich eine eindeutige Ausrichtung der Silberlinien, die im großen und ganzen ein Spiegelbild der Blutströmungen innerhalb der verschiedenen Herzzräume darstellen.

Es wurde diskutiert, ob die erstmalig beschriebenen Silberlinienmuster der Endothelzellen des Herzens vielleicht "Führungslinien" für den Blutstrom darstellen, die ähnlich den Zügen im Gewehrlauf, strömungsbestimmende, bzw. stabilisierende Funktionen erfüllen können. Auch die Natur und Entstehung der Silberlinien wird eingehend besprochen und dazu eine neue Hypothese angeboten.



Abb.1 Vorhofendothel-rechtes Herzohr. Man sieht deutlich, wie sich die schmalen Zellen fischzugartig über den Muskelbalken hinweg erstrecken und nur lokal, den örtlichen Bedingungen entsprechend, umordnen. Rechts oben (Pfeil) mündet ein kleines Gefäß.
(Nachversilberung, Zeichnung nach Originalpräparaten, Vergr. ca. 150x)



Abb. 2 Vorhofendothel rechts. Palisadenförmige Anordnung der vieleckigen, mal stumpf, mal spitz auslaufenden Zellen. Die Zellkerne zeigen in Richtung des Längsdurchmessers der Zellen.
(Nachversilberung, ca. 400x Vergr.)

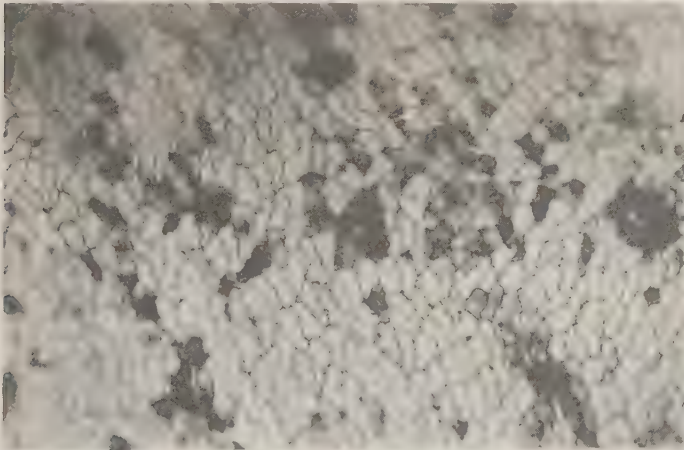


Abb. 3 Trikuspidalklappe am Übergang zum Vorhof. Das vieleckige Endothelmuster ist deutlich erkennbar. Mehr oder weniger dichte, feinkörnige Niederschläge auf einzelnen Zellen sind autolytisch bedingt.
(Nachversilberung, ca. 240x Vergr.)

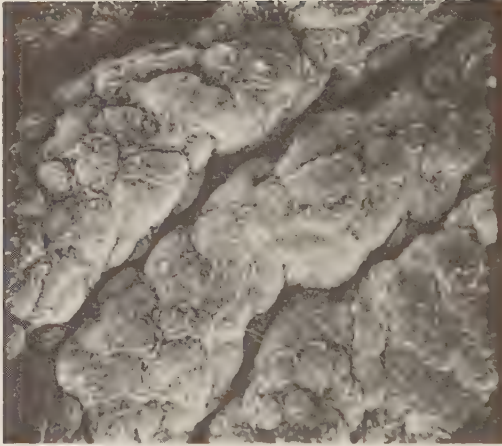


Abb. 4 REM-Bild vom Endothel der Trikuspidalklappe, Einstrombahn. Man beachte die kleinen polygonalen Endothelzellen, die wenig größer als die Kerne sind. Multiple Mikrovilli sind zu erkennen. (1300x Vergr.)

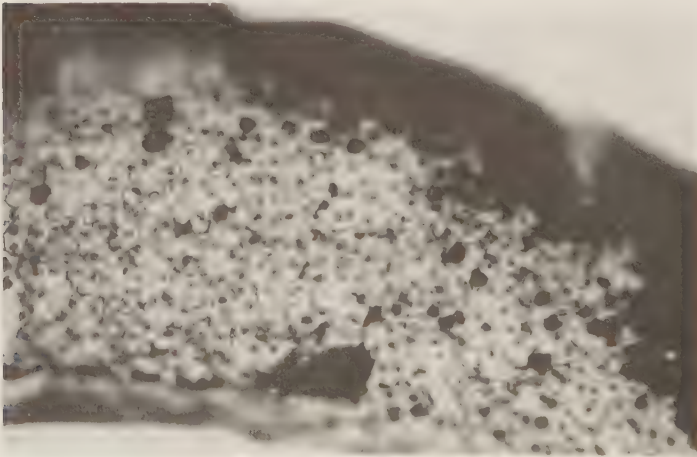


Abb. 5 Endothel eines Sehnenfadens rechte Herzkammer. Man erkennt deutlich die für Klappenrand und Sehnenfäden, auch für dünne Muskelvorsprünge des Trabekelgerüstes, typische Anordnung mit polygonalen, kubischen Zellen, die quer oder schräg zur Sehnenrichtung orientiert ist. Die Zellkerne sind rundlich. (Nachversilberung, ca. 240x Vergr.)

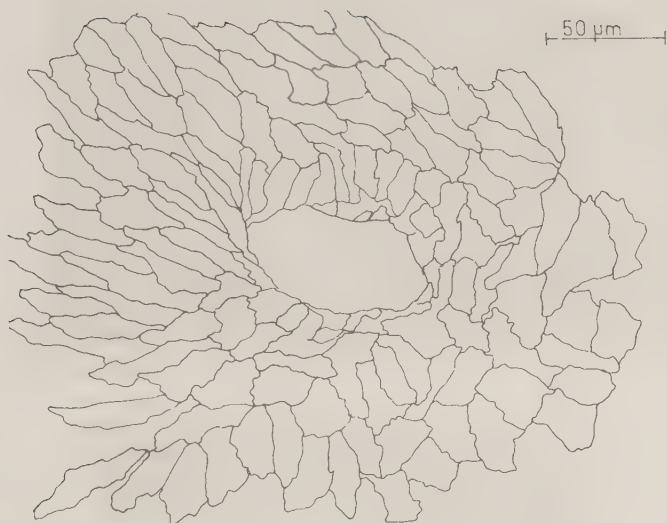


Abb. 6 Endothelmuster an der Herzspitze rechts. Typisches Ostium, wie es innerhalb der Trabekelmuskulatur vorkommt. (Nachversilberung, Zeichnung nach Originalpräparat, ca. 450x Vergr.)

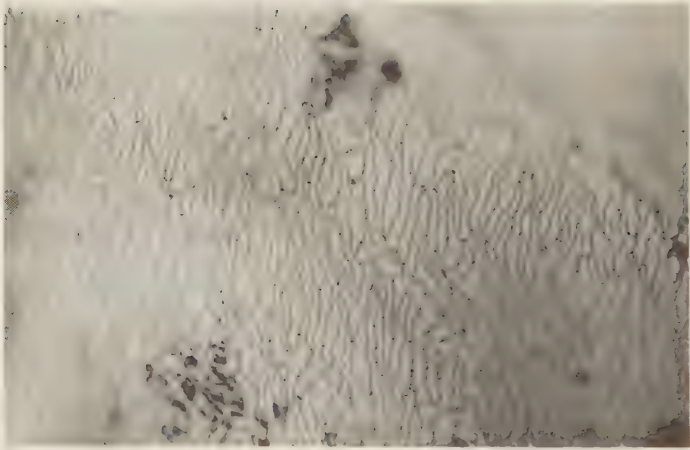


Abb. 7 Endothelmuster an der Einstrombahn oder Ausstrombahn (re. Herz). Ausgeprägte gezackte Silberlinien und rundliche Zellpole. Die Endothelzellen folgen der undulierenden Oberfläche.
(Nachversilberung, 450x)

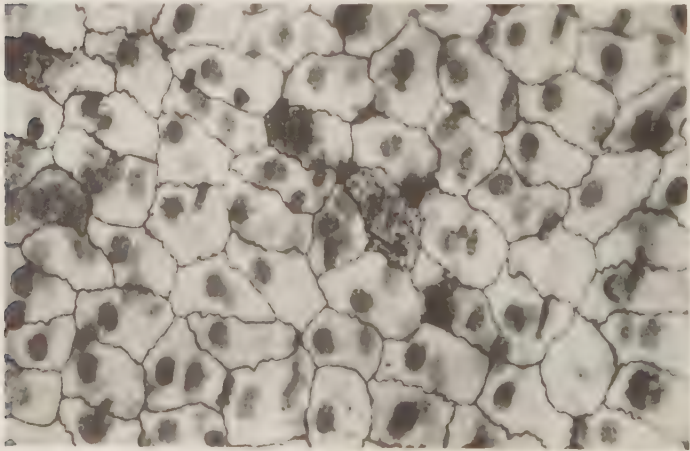


Abb. 8a Endothel eines Sehnenfadens. Polygonales, kubisches Endothelmuster mit rundlichen Kernen. Man erkennt deutlich auch hier eine gewisse Ausrichtung der Zellen.
(Nachversilberung, ca. 600x Vergr.)



Abb. 8b REM-Aufnahmen vom Trikuspidalklappenrand mit Sehnenfaden (Nachversilberung, Lufttrocknung, 260x Vergr.)

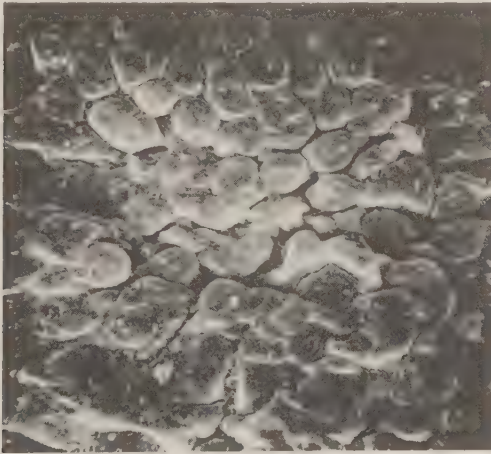


Abb. 8c REM-Aufnahme vom Trikuspidalrand mit Sehnenfaden. Pflastersteinförmiges Endothel mit breit klaffenden Zwischenräumen, das eine mosaikartige, schräg zur Fadenrichtung verlaufende Anordnung zeigt. Durch Schrumpfung imponieren vorwiegend die Zellkerne. (Nachversilberung, Detailvergr. v. 8b, 1300x)

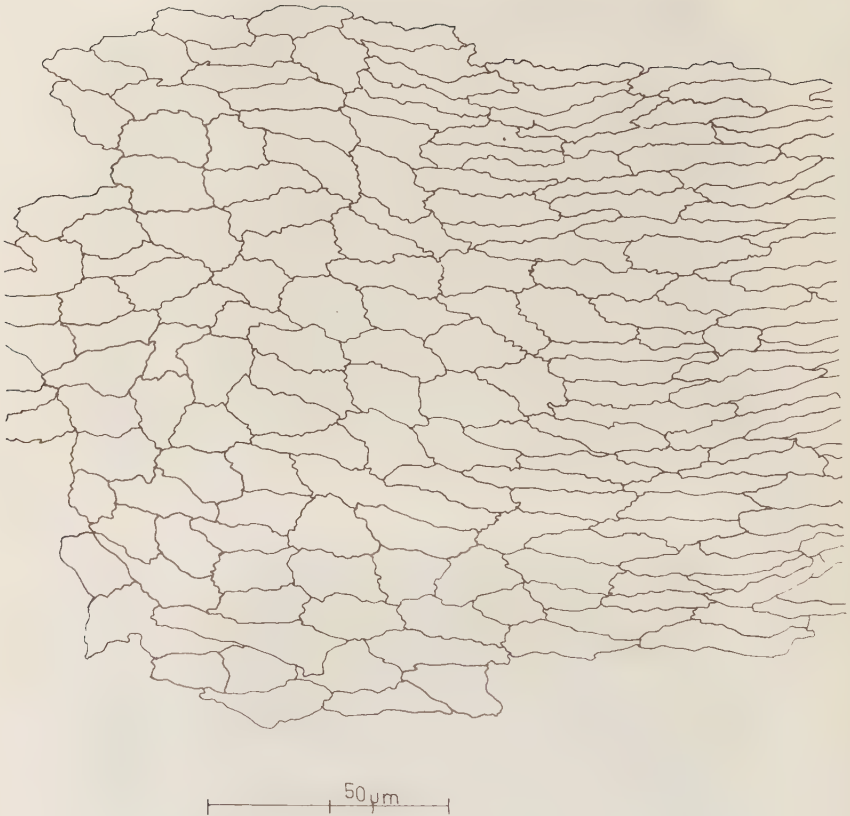


Abb. 9 Silberlinien vom Endokardendothel am Übergang von der rechten Herzspitze in einen Muskelspalt. Man beachte die Änderungen der Zellformen beim Übergang von der Ausstrombahn in einen Spalt zwischen zwei Muskelbälkchen (re.).
(Nachversilberung, Zeichnung nach Originalpräparat, ca. 460x Vergr.)

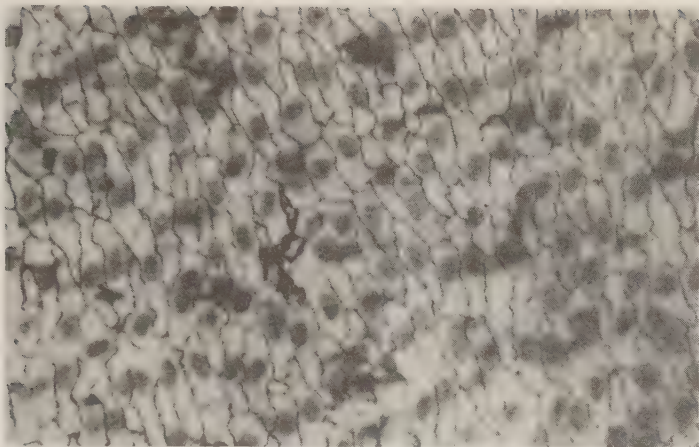


Abb. 10 Endothel an der Ausstrombahn, re. Ventrikel.
Die regelmäßige Ausrichtung der Zellen in Stromrichtung
wird deutlich.
(Nachversilberung, ca. 480x Vergr.)

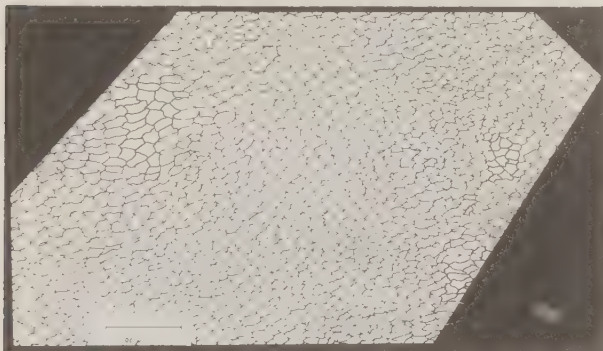


Abb. 11 Endothel des linken Vorhofs medial. Deutlich er-
kennt man hier das für die Venenendothelien typische
Endothelmuster. Die Zellen sind von links nach rechts aus-
gerichtet.
(Nachversilberung, Zeichnung nach Originalpräp., ca. 150x
Vergr.)

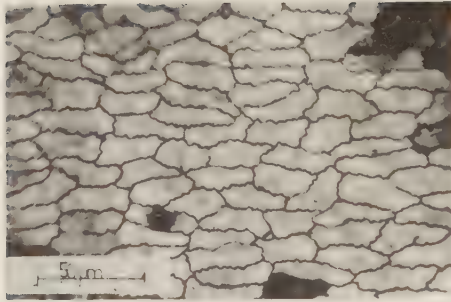


Abb. 12 Mikrophotogramm vom Vorhofendothel lat. Seite linkes Herz. Typisches Venenendothel mit palisadenförmiger Ausrichtung (Nachversilberung, ca. 400x Vergr.)

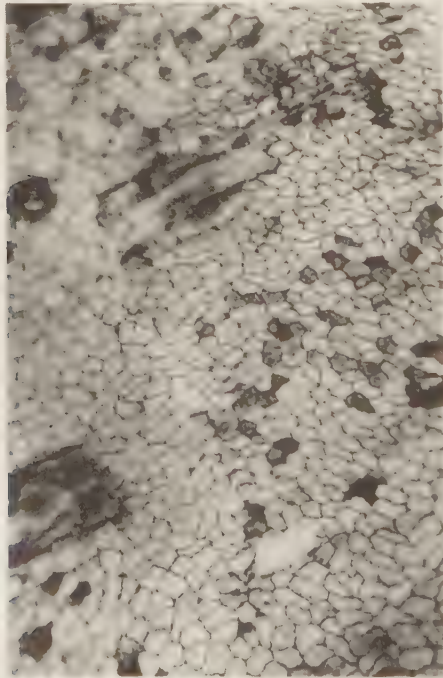


Abb. 13 Mikrophotogramm vom Vorhofendothel med. Seite linkes Herz. Typisches Venenendothel mit herdförmiger unbestimmter Ausrichtung. (Nachversilberung, ca. 200x Vergr.)

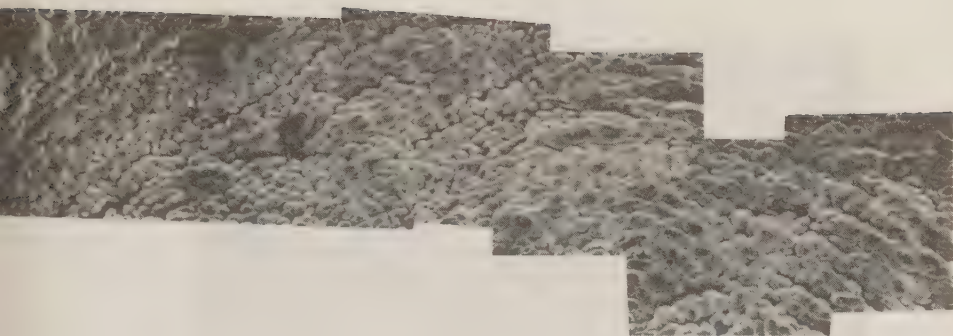


Abb. 14a REM-Aufnahmen von der Mitralklappe, Einstrombahn, Aortales Segel. Rundliche, polygonale bis kubische Zellformen. Man erkennt deutlich auch gestreckte, längliche sich überlappende Zellen. (Lufttrocknung, ca. 280x Vergr.)

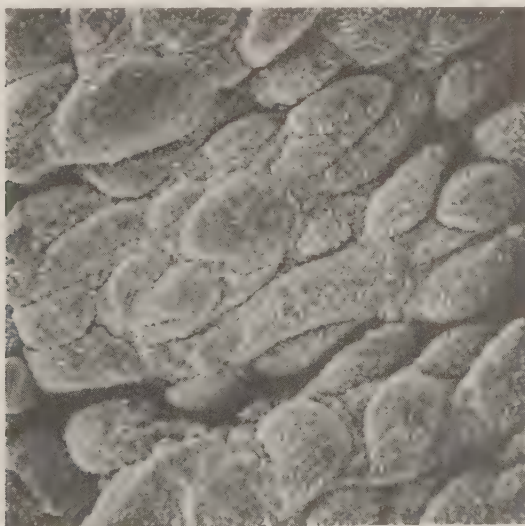


Abb. 14b Die Zellen liegen dichtgedrängt und wölben sich in das Lumen vor. Vermutlich durch Schrumpfung bei der Trocknung sind Spalten entstanden. An manchen Stellen sind Reste ehemaliger Randfalten noch zu erkennen. An der Zelloberfläche erscheinen Mikrovilli. (Lufttrocknung, ca. 1800x Vergr.)



Abb. 15 Vergrößerung vom Endothel der Mitralklappe, Einstrombahn. Typische multangulare, vielfach verzweigte Anordnung der Endothelzellen. (Nachversilberung, ca. 240x Vergr.)

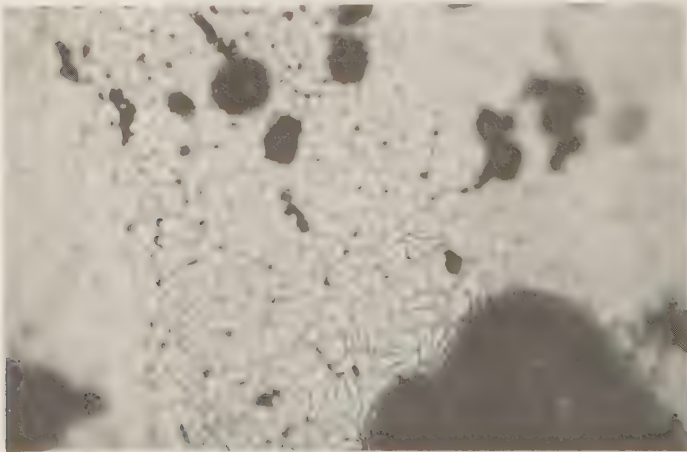


Abb. 16 Endothel an der lateralen Wand des linken Ventrikels, Einstrombahn. Die für den Bereich der trabekulären Muskelmaschen an der Herzspitze und für die Einstrombahn charakteristische Zellordnung wird sichtbar. Vielfach verzweigt, wirbelbildend, bedeckt das Endothel die Nischen und Hohlräume. Andere Formen, wie am Papillarmuskel gezeigt (keine Abbildung), kommen ebenfalls vor. (Nachversilberung, ca. 240x Vergr.)

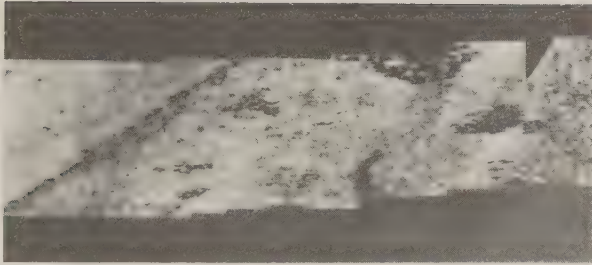


Abb. 17 Endothelmuster im Bereich der Ausstrombahn
mittleres Drittel, linker Ventrikel. Zusammenhängende
Ausrichtung von Endothelzellen.
((Nachversilberung, 170 x Vergr.)



Abb. 18 Endothel der Ausstrombahn im linken Ventrikel. Die länglichen Endothelzellen sind gleichmäßig ausgerichtet. Die Zellpole gehen vielfach spitz ineinander über.
(Nachversilberung, ca. 250x Vergrößerung)



Abb. 19 Endothel der Noduli Arantii. Schmale lange und spitz ausgezogene Zellen bedecken das Knötchen und lagern sich zum Teil zwiebelschalenartig an.
(Nachversilberung, ca. 240x Vergr.)



Abb. 20 REM-Aufnahme vom Endothel der Ausstrombahn (links, mittleres Drittel). Die Zellen sind dicht gelagert und bilden eine faltige Oberfläche. Die Zellkerne springen deutlich ins Lumen vor. Deutlich sind Mikrovilli zu erkennen.
(Critical point-Trocknung, ca. 1400x Vergr.)



Abb. 21 Rasterelektronische Aufnahme vom Endothel der Mitralklappe, die Teilvergrößerung von Abb. 14a. Die zentrale Endothelzelle zeigt eine große ovale Öffnung. Man erkennt im übrigen zahlreiche Mikrovilli an der Zelloberfläche.
(Lufttrocknung, ca. 3500x Vergr.)

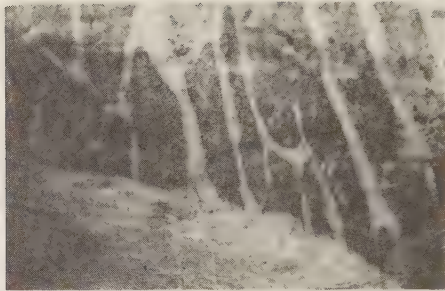


Abb. 22 Subendokardiale Gefäße im Bereich der rechten Herzkammer, Trabekelwerk, Ansatz eines Papillarmuskels. In der Übersicht erkennt man ein stark verzweigtes Muster von Gefäßen, die teilweise blind enden und unter dem Endokard liegen.
(Nachversilberung, ca. 80x Vergr.)

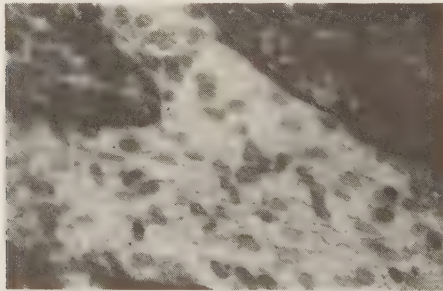


Abb. 23 Ausschnittvergrößerung. Man sieht eine Gefäßverzweigung, sowie längliche Zellen, die in Richtung der Gefäße verlaufen.
(Nachversilberung, ca. 400x Vergr.)

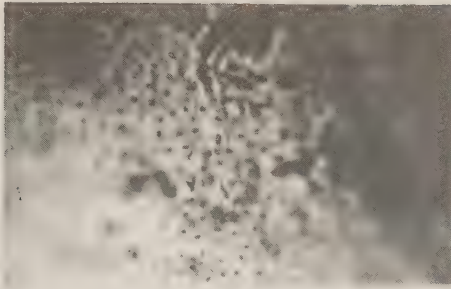


Abb. 24 Auflichtmikroskopische Aufnahme von subendokardialen Gefäßen im Bereich der rechten Herzkammer, Trabekelwerk, Ansatz eines Papillarmuskels. Man erkennt neben einer dichten Silbermasse kleine schwarze, rundliche bis ovale Löcher, die den Endothelkernen des bedeckenden Endokards entsprechen. Dieses erscheint an einigen Stellen "aufgebrochen", so daß das subendotheliale Gefäß nicht sichtbar wird. (Nachversilberung, ca. 220 x Vergr.)

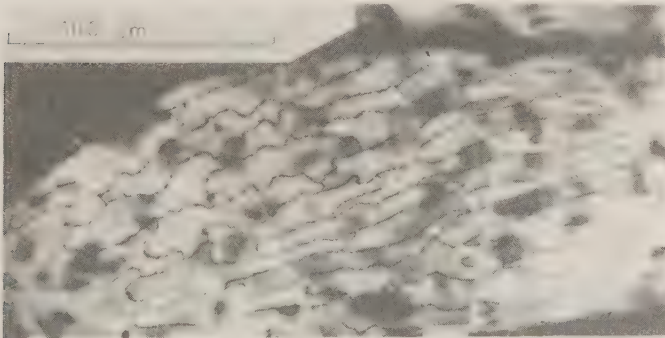


Abb. 26 Endothelmuster eines subendokardialen Gefäßes in der rechten Herzkammer. Man erkennt deutlich die charakteristische Zellstruktur. Die Zellgrenzen sind etwas verkräuselt und teilweise ineinander verfugt. (Nachversilberung, ca. 500x Vergr.)

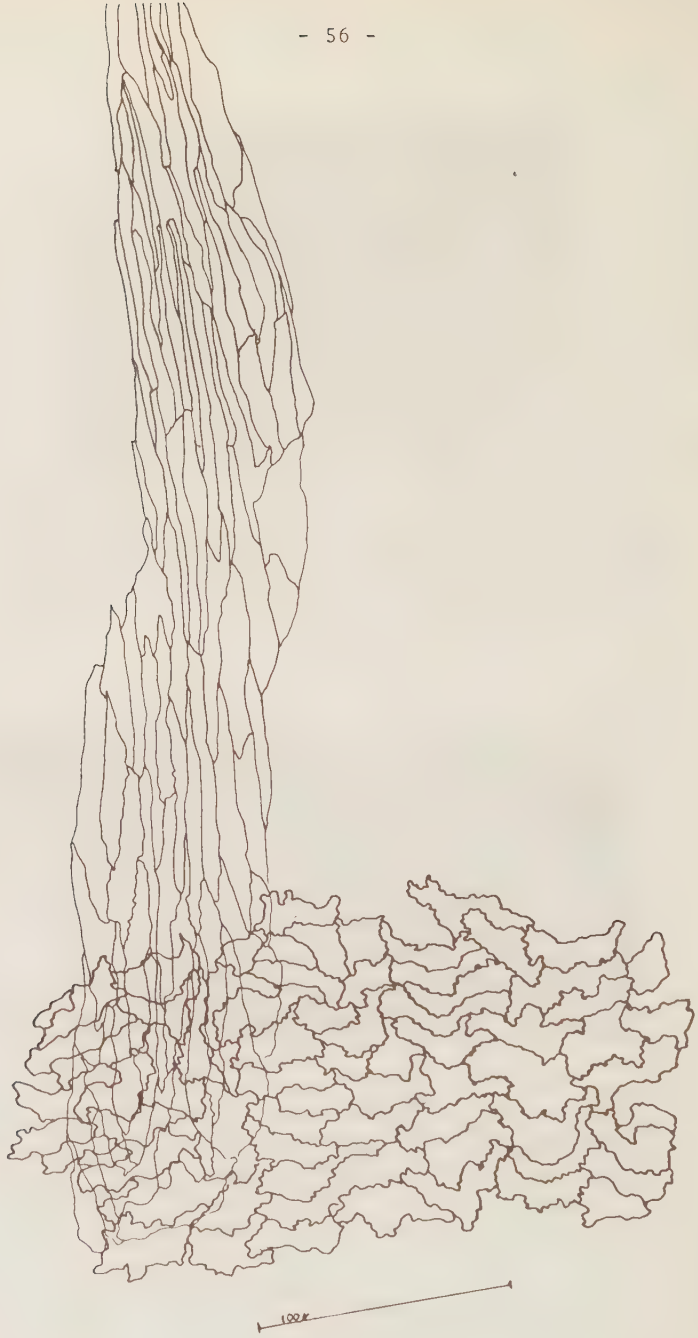


Abb. 25 Subendokardiales Gefäß mit darüberliegendem Endokardendothel. (Zeichnung nach Originalpräparat, Nachversilberung, 480x Vergr.)

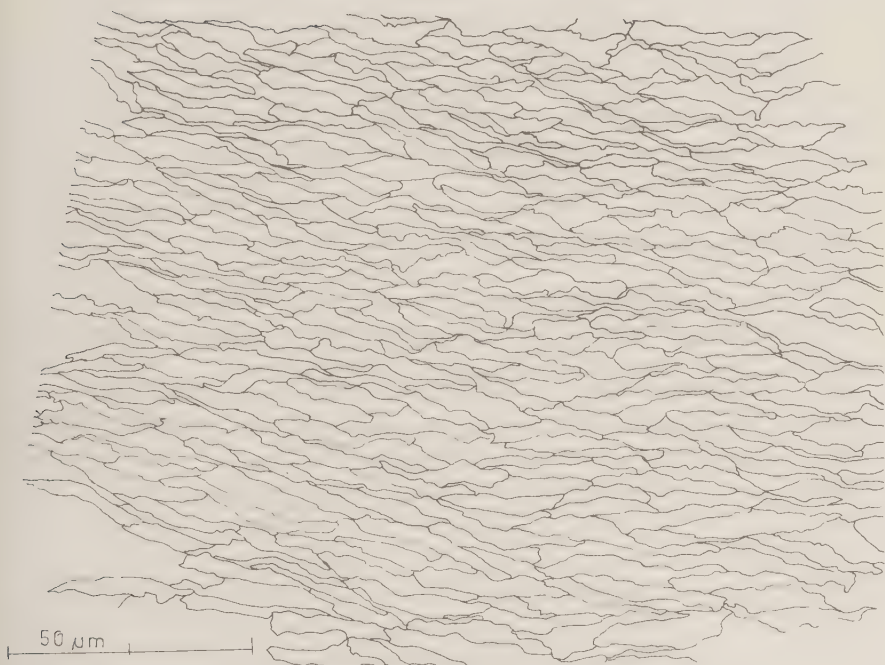
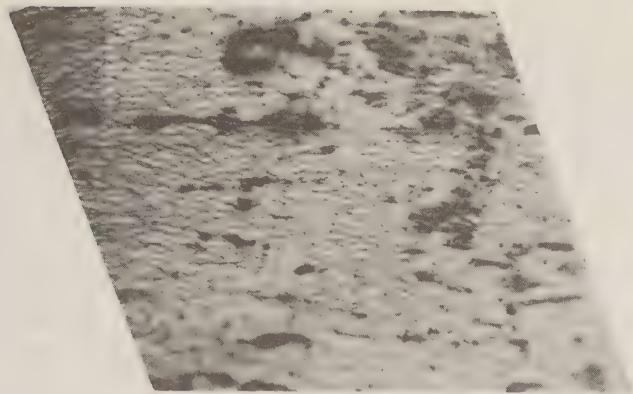


Abb. 27 Aortenendothel nach Ausrichtung distal der Klappenebene. (Nachversilberung, ca. 200x Vergr.) Deutlich erkennt man gegenüber den bekannten Bildern des Endokardendothels, daß die Aorta lange schmale, fusiform ausgezogene Zellformen hat, welche sich in Gefäßrichtung ausrichten.

Abb. 52 Zeichnung.

7. Literaturverzeichnis

- Achard, G.H. et M. Aynaoud: Sur les conditions histochimiques de l'impregnation par l'argent, C. rend. Soc. Biol. Paris 61:43-44 (1906).
- Recherches sur l'impregnation histologique de l'endothelium. Arch. méd. exper. Paris 19:437-458 (1907)
- Asmussen, I., K. Kjieldsen: Intimal ultrastructure of human umbilical arteries. Circ. Research 36 (May 75):579-588 (1975).
- Bartel, P.: Über Verlauf der Lymphgefäße der Schilddrüse bei Säugetieren und beim Menschen. Anat. H. 16:333-379 (1901).
- Das Lymphgefäßsystem in Bardelebens Handbuch der Anatomie des Menschen. Bd. 3:1-280 (1909).
- Bellhouse, B.J.: Fluid mechanics of a model mitral valve. Phys. Soc. Jan. 70:71-71 (1970).
- Fluid mechanics of model normal and stenosed aortic valves. Circ. Research Vo. XXV, Dec. 69:639-704 (1969).
 - Fluid mechanics of heart valves in "Cardiovascular fluid dynamics". Ed. by Bergel 1972, Vol. 1:261-284 (1972).

- Benninghoff, A.: Blutgefäße und Herz. In: Handbuch der mikroskopischen Anatomie des Menschen, Bd. VI/1, Springer 1930.
- Bjöckerud, S., H.A. Hansson, G. Bondjers: Subcellular valves and canaliculi in arterial endothelium and their equivalence to so called stigmata. Virchows Arch. Abt. B. Zellpath. 11:19-23 (1972).
- Buss, H., H. Dahm, R. Lindenfelser: Die Oberfläche des Endokards des Rattenherzen. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen. Beitr. Path. Bd. 148: 340-365 (1973).
- Buss, H.: Scanning electron microscopy in pathology. Beitr. Path. Bd. 148:315-339 (1973).
- Büssow, H.: Zur Wandstruktur der großen Arterien der Vögel. Z. Zellforschung 112:211 (1973).
- Candiollo, L.: The fine structure of the endocardial endothelium. Z. Zellf. 61:486-492 (1963).
- Casparis, .: Lymphatics of the omentum. Anat. Rec. 15:93-99 (1919).
- Christensen, C.B., C.A. Garbarsch: A scanning electron microscopic (SEM) study. Angiologica 9:15-26 (1972).
- Dahm, H.H., H. Buss, H.G. Holweg: Das Endothel der A. carotis comunis im Bereich experimenteller Stenosen. Rasterelektronische Untersuchungen. Verh. Dtsch. Ges. Kreislauf 40:222-224 (1973).
- Edanaga, M.: A scanning electron microscope study on the endothelium of the vessel. Fine structure of the endothelial surface of aorta and some other arteries in normal rabbits. Arch. histol. jap. 37/1:1-14 (1971).

- Fawcett, D.W.: Die Zelle. Urban & Schwarzenberg München-Berlin-Wien 1969.
- Flaherty, J.T. et al.: Endothelial nuclear pattern in the canine arterial tree with particular reference to hemodynamic events. Circ. Res. Vol. XXX, Jan. 72:23-33 (1972).
- Fry Donald L.: Certain histological and chemical response of vascular interface to acutely induced mechanical stress in the aorta of the dog. Circ. Res. Vol. XXIV, Jan. 1969:93-108 (1969).
- Garbarsch, C., C.D. Christensen: Scanning electron microscopy of aortic endothelial cell boundaries after staining with silver nitrate. Angiologica 7: 365-373 (1970).
- Gauer-Kramer-Jung: Physiologie des Menschen. Bd. 3 Herz und Kreislauf. Urban & Schwarzenberg (1972).
- Gottlob, R., G. Zinner: Über die Regeneration geschädigter Endothelien nach hartem und weichem Trauma. Virch. Arch. path. Anat. 336:15-32 (1962).
- Hirsch, M., G. Renard, J.P. Faure, Y. Pouliquen: Formation of intercellular spaces and junctions in regenerating rabbit corneal endothelium. Exp. Eye Res. 23: 383-397 (1976).
- His, W.: Über das Verhalten des salpetersauren Silberoxyds zu tierischen Gewebsbestandteilen. Virch. Arch. 20:207-209 (1861).

- Linzbach, A., W. Hort: Mikroskopische Untersuchungen am Gefäßendothel mit Phasenkontrast- und Auflichtverfahren. Virch. Arch. 329:669-693 (1957).
- Lunkenheimer, P.P., H.J. Merker: Morphologische Studien zur funktionellen Anatomie der Sinusoide im Myokard. Z. Anat. Entwickl.Gesch. 142:65-90 (1973).
- Hellman Lund: Lymphgefäße, Lymphknötchen und Lymphknoten im Handbuch der mikr. Anat. d. Menschen, Bd. VI 1930.
- Lütjen-Drecoll, E. und J.W. Rohen: Über die Auskleidung des Schlemm'schen Kanals im Silberimprägnationsbild. Albr.v.Graef.Arch.klin.exp.Ophthal. 180:249-266, Springer Verl. (1970).
- Maguire, K.F.: Scanning electron microscopy of mouse endocardium and venae cordis minimae foramina. Z. Anat. Entw. Gesch. 139:107-114 (1972).
- Noack, W., J.U. Schweichel, P. Lunkenheimer: Elektronenmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zur Morphologie der Sinusoide im Herzen der Ratte. Z. Anat. Entw. Gesch., Bd. 143, 1973, 174-178.
- Peine, C.J., N.L. Frank: Scanning electron microscopy of cardiac endothelium of the dog. Am. J. Anat. 142: 137-158 (1975).
- Reumuth, H., V. Becker: VStereoscan - ein neues Elektronenmikroskop. Klin. Wschr. 46. Jg. Heft 2, 81-85 (1968).
- Rushmer, R.F.: Functional anatomy of cardia contraction. Cardiovasc. Dynamics 3 rd ed., Saunders Comp. 1970.

Rushmer, R.F., D.K. Crystal, C. Wagner: The functional anatomy of ventricular contraction. *Circ. Res.* 1:162-170 (1953).

Schultz, D.L., D.S. Tunstall-Pedoe, G. de J. Lee, A.J. Gunning and B.J. Bellhouse: Velocity distribution and transition in the arterial system. In *Ciba Foundation Symposium on Circ. and Respir. Mass Transport London July 1968.*

Shimamoto, T., Y. Yamashita and T. Sunaga: Scanning electron microscope observations of the endothelial surface of heart and bloodvessels. *Proc. Japan. Acad.* 45:507-512 (1969).

Sinapius, D.: Über das Aortenendothel. *Virch. Arch.* 322:662-694 (1952).

- Das Endothel der Herzklappen und Herzvorhöfe im Häutchenpräparat, zugleich ein Beitrag zu Morphologie der Endocarditis. *Virch. Arch.* 324:588-611 (1954).
- Über die Grundlagen und Bedeutung der Vorversilberung und verwandte Methoden nach Untersuchungen am Aortenendothel. *Z.f.Zellforsch.* 44:27-56 (1956).
- Über das Endothel der Venen. *Z.f.Zellforsch.* 47:560-630 (1958).

Taylor, D.E.M., J.D. Wade: The pattern of flow around the atrio-ventricular valves during diastolic ventricular filling. *Phy. Soc. Jan.*, 71-71 (Jan.1970).

Wheeler, E.E., J.B. Gabin, P.B. Herson: A study of endocardial endothelium using freeze drying and scanning electron microscopy. *Anat. Rec.* 175:579-584 (1972).

Zimmermann, K.W.: Der feinere Bau der Blutkapillaren.
Z. Anat. 68:30-109 (1923).

Lebenslauf

- 2.Sept.1943 geboren als erster Sohn des Kaufmanns
und damaligen Marineoffiziers Manfred
Schmidt und der Bildhauerin Lotte
Schmidt geb. Hofmann in Glücksburg/
Flensburg.
- 1950 bis 1964 Schulausbildung in Glücksburg/Flensburg
in Viernheim/Mannheim
in Mannheim
in Altensteig/Nagold Schw.
- 1964 bis 1965 Industriepraktikum in einem Lebensmittel-
betrieb in Darmstadt
Studium an der Werkkunstschule in Darm-
stadt für 1 Semester
- 1964 bis 1966 Besuch einer privaten Abendschule
- 1966 Nichtschülerreifeprüfung am Lichtenberg-
Gymnasium in Darmstadt
- 1967 bis 1970 Dienst in der Bundesmarine als Schiffs-
operationsoffizier und im Stab des Flot-
tenkommandos in Glücksburg.
Entlassung Ende 1970. Nach Wehrübungen
letzter Dienstgrad Kapitänleutnant d.Res.
- Oktober 1970 Studium der Medizin in Marburg. Dort
1971 Vorphysikum und 1973 Physikum

August 1974 Wechsel des Studienortes nach Erlangen.
1975 Eheschließung mit Frau Gisela, geb.
Hetz
1976 Staatsexamen an der Universität Erlangen-
Nürnberg am 4. August 1976
1976-1977 Medizinalassistent am Anatomischen
Institut der Universität Erlangen-Nürnberg,
am Städtischen Krankenhaus Nürnberg und am
Kreis Krankenhaus Neumarkt/Obpflz.
31.Oktob.1977 Approbation als Arzt durch das Bayerische
Staatsministerium des Innern
ab 1977 Weiterbildung zum Facharzt für Innere
Medizin am Kreis Krankenhaus Neumarkt,
derzeit im 2. Facharztjahr.

Danksagung

Für die jederzeit hilfreiche Unterstützung bei der Fertigstellung meiner Arbeit bedanke ich mich sehr herzlich bei Frau Prof.Dr.med.E.Drecoll-Lütjen, Anatomisches Institut der Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg und Herrn Prof.Dr.med.Dr.med.h.c.J.W.Rohen, Vorstand des Anatomischen Institutes der Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

Für die Mithilfe und Beratung beim technischen Teil dieser Arbeit gilt mein Dank auch Frau Pantel und Frau Link.

Besonderer Dank gilt auch meiner Frau Gisela Schmidt-Hetz, die mich mit viel Verständnis tatkräftig unterstützt hat.

